

На правах рукописи



ТОМИЛОВ Вячеслав Станиславович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕЖИМА РЕКУПЕРАТИВНОГО  
ТОРМОЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОВОЗА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

2.9.3. Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация  
(технические науки)

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Иркутск – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС).

**Научный руководитель:** **Мельниченко Олег Валерьевич**  
доктор технических наук, профессор, кафедра «Электроподвижной состав» федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения», заведующий кафедрой

**Официальные оппоненты:** **Лакин Игорь Капитонович**  
доктор технических наук, профессор, начальник ситуационно-аналитического центра мониторинга и реагирования Дирекции по контролю качества эксплуатации подвижного состава АО «Трансмашхолдинг»

**Скорик Виталий Геннадьевич**  
кандидат технических наук, доцент, кафедра «Электротехника, электроника и электромеханика» федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный государственный университет путей сообщения», заведующий кафедрой

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный университет путей сообщения»

Защита диссертации состоится «06» октября 2022 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета 40.2.002.07 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта» РУТ (МИИТ) по адресу: 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9, ауд. 2505.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте РУТ (МИИТ) [www.mii.ru](http://www.mii.ru).

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Воронин Николай Николаевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Холдинг ОАО «Российские железные дороги» потребляет до 7 % электроэнергии ежегодно, производимой в Российской Федерации, и входит в состав крупнейших потребителей энергоресурсов в России. Рациональное и бережливое отношение ко всем видам ресурсов является одним из приоритетных условий развития экономики страны в целом.

Уменьшение энергопотребления электровозами при реализации тяговых и тормозных усилий является приоритетным фактором для экономии энергетических ресурсов, что сказано в перечне Федеральных и стратегических распоряжений:

- распоряжении ОАО «РЖД» от 11.02.2008 г., № 269р «Об энергетической стратегии ОАО «РЖД» на период до 2030 года»;
- указе Президента РФ от 01 декабря 2016 г., № 642 «О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации»;
- распоряжении ОАО «РЖД» от 14.04.2018 г., № 769р «Об стратегии научно-технологического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 года и на перспективу до 2030 года (Белая книга)»;
- долгосрочной программе развития холдинга ОАО «РЖД» до 2025 года утвержденная Правительством Российской Федерации от 19 марта 2019 г., № 466р и др.

Сегодня, на железных дорогах России, электрифицированных переменным током, работают электровозы с коллекторными тяговыми электрическими двигателями (ТЭД), напряжение на зажимах которых регулируется плавно выпрямительно-инверторными преобразователями (ВИП). Применение инверторного режима таких преобразователей открывает возможность в реализации электрического рекуперативного торможения.

Использование электрического рекуперативного торможения на электроподвижном составе однофазно-постоянного тока дает возможность отдачи электроэнергии в контактную сеть, снижения износа тормозных колодок и колесных пар электроподвижного состава (ЭПС), повышения безопасности движения тяжеловесных поездов на спуске и др.

Поддержание неизменной скорости движения состава на затяжных спусках становится возможным благодаря жестким тормозным характеристикам электровоза в режиме рекуперативного торможения, а это в свою очередь положительно сказывается на технической скорости и пропускной способности тягового участка.

Приоритетным направлением повышения энергоэффективности холдинга ОАО «РЖД» является увеличение величины удельной рекуперации энергии в тяговую сеть.

Одним из путей достижения поставленной задачи является увеличение коэффициента мощности электроподвижного состава. Данный коэффициент характеризует долю активной мощности электровоза к полной, который в свою

очередь является крайне низким и не превышает значения 0,65. При таком показателе коэффициента мощности имеет место быть значительное потребление электровозом реактивной энергии из контактной сети, как следствие снижение пропускной способности тяговой сети, потеря мощности в электрооборудовании, значительное искажение тока в контактной сети, загрузка сети реактивной мощностью и др.

На сегодняшний день, несмотря на совершенствование системы рекуперативного торможения на протяжении полувека, все еще имеются значительные ее недостатки, в свою очередь которые не позволяют в полной мере осуществлять энерго- и ресурсосбережение. В силовой электрической цепи электровоза переменного тока имеется наличие блока балластных резисторов (ББР), необходимость которого диктуется условием статической устойчивости режима ресурсосберегающего рекуперативного торможения. Наличие балластных резисторов в якорных цепях ТЭД не только значительно снижает энергетические показатели электровоза, но и ограничивает область его тормозных характеристик.

Поэтому изыскания путей повышения эффективности режима рекуперативного торможения электровозов переменного тока остается актуальным.

**Степень разработанности темы исследования.** В данной работе проведен анализ научных трудов в области повышения эффективности работы электровоза в режиме рекуперативного торможения. Отмечены работы ученых и специалистов таких как Б.Н. Тихменева, Л.М. Трахтмана, А.В. Плакса, Л.В. Поссе, С.В. Захаревича, С.А. Петрова, В.А. Голованова, Б.И. Хоменко, К.Г. Кучмы, С.Н. Засорина, А.И. Харитоновна, А.Н. Савоськина, Ю.М. Инькова В.А. Кучумова, Ю.А. Басова, В.М. Антюхина, Г.А. Штибена, А.Л. Лозановского, Б.М. Наумова, Н.С. Копанева, С.В. Власьевского, В.Г. Щербакова, Л.Д. Капустина, Ю.М. Кулинича, В.Т. Черемисина, А.М. Рутштейна, И.К. Лакина, В.В. Литовченко, В.В. Макарова, А.В. Каменева, О.Е. Пудовикова, А.М. Евстафьева, О.В. Мельниченко и многих других. Эти исследования стали научной основой при выполнении диссертационной работы. В трудах ведущих учёных отражены методы исследования процессов инвертирования при конечных величинах индуктивностей и активных сопротивлений цепей переменного и выпрямленного тока, исследования схемных решений и влияния основных параметров схемы электровоза на его тормозные и электрические характеристики, исследование гармонических составляющих переменного тока в контактной сети при работе электровозов, а также исследования взаимодействия электровозов с устройствами энергоснабжения и др. В результате исследований разрабатываются технические средства, способы и алгоритмы управления ВИП, которые позволяют использовать рекуперативное торможение на электровозах переменного тока более эффективно с точки зрения технико-экономических показателей.

**Целью работы** является обеспечение статической устойчивости режима рекуперативного торможения электровоза переменного тока, расширение его области тормозных характеристик и повышение возврата тока в контактную сеть за счет

исключения балластного резистора из якорной цепи тягового электрического двигателя.

**Для достижения указанной цели** в диссертационной работе поставлены и решены следующие задачи:

- выполнен анализ существующих технических средств, способов и алгоритмов управления выпрямительно-инверторным преобразователем, направленных на повышение эффективности режима рекуперативного торможения электровоза переменного тока;

- рассмотрен принцип обеспечения статической устойчивости режима рекуперативного торможения электровоза переменного тока;

- разработан способ реализации рекуперативного торможения без блока балластных резисторов в якорной цепи тяговых электрических двигателей;

- произведен расчет внешних характеристик генератора и инвертора с целью подтверждения устойчивой работоспособности режима рекуперативного торможения без блока балластных резисторов;

- произведен расчет тормозных характеристик электровоза переменного тока с выпрямительно-инверторным преобразователем на базе *IGBT*-транзисторов при исключении блока балластных резисторов из его силовой цепи;

- произведен расчет коэффициента полезного действия электровоза переменного тока с выпрямительно-инверторным преобразователем на базе *IGBT*-транзисторов при исключении блока балластных резисторов из его силовой цепи;

- доработана математическая модель системы «тяговая подстанция-контактная сеть-электровоз» для режима рекуперативного торможения, учитывающая применение выпрямительно-инверторного преобразователя на базе *IGBT*-транзисторов и исключение блока балластных резисторов из силовой цепи;

- выполнена оценка адекватности математической модели на соответствие электромагнитных процессов полученных в ходе физического моделирования;

- проведены экспериментальные исследования предлагаемого способа реализации рекуперативного торможения при исключении блока балластных резисторов из силовой цепи электровоза с выпрямительно-инверторным преобразователем на базе *IGBT*-транзисторов.

**Объектом исследования** является электровоз, работающий в режиме рекуперативного торможения электровоза переменного тока с ВИП на базе *IGBT*-транзисторов.

**Предметом исследования** является статическая устойчивость режима рекуперативного торможения электровоза переменного тока без ББР в якорной цепи ТЭД.

**Методология и методы исследований.** Исследования основаны на применении математического моделирования и теории преобразовательных устройств. Экспериментальные исследования проводились на математической модели

в среде *MatLab/Simulink* и на физической модели в сервисном локомотивном депо «Боготол-Сибирский» филиал Восточно-Сибирский ООО «ЛокоТех-Сервис».

**Научная новизна** диссертационной работы заключается в следующем:

- предложен способ реализации рекуперативного торможения на электровозах переменного тока с выпрямительно-инверторными преобразователями на базе *IGBT*-транзисторов для обеспечения статической устойчивости системы «генератор-инвертор» без использования балластного резистора в якорной цепи тягового электродвигателя;

- предложена методика обеспечения электрической устойчивости режима рекуперативного торможения электровоза переменного тока с выпрямительно-инверторными преобразователями на базе *IGBT*-транзисторов при исключении блока балластных резисторов из его силовой цепи.

**Теоретическая и практическая значимость работы** заключается в следующем:

- разработан алгоритм основной программы блока управления ВИП на базе *IGBT*-транзисторов для организации положительного наклона внешней характеристики преобразователя с целью обеспечения статической устойчивости режима рекуперативного торможения без блока балластных резисторов;

- доработана математическая модель системы «тяговая подстанция – контактная сеть – электровоз» в режиме рекуперативного торможения в среде *MatLab/Simulink* с учетом применения предлагаемого алгоритма управления ВИП на базе *IGBT*-транзисторов при реализации рекуперативного торможения без ББР в силовой цепи электровоза;

- проведены экспериментальные исследования предлагаемого способа реализации рекуперативного торможения при исключении блока балластных резисторов из силовой цепи электровоза с транзисторным ВИП на испытательной станции СЛД «Боготол-Сибирский», которые показали увеличение энергетических показателей электровоза в режиме рекуперативного торможения и позволили сделать вывод о работоспособности предлагаемого алгоритма управления ВИП.

**Основные положения диссертации, выносимые на защиту:**

- алгоритм управления транзисторными выпрямительно-инверторными преобразователями, позволяющий исключить блок балластных резисторов из силовой цепи электровоза при обеспечении статической устойчивости режима рекуперативного торможения;

- результаты аналитического расчета тормозных характеристик электровоза переменного тока с выпрямительно-инверторными преобразователями на базе *IGBT*-транзисторов, внешних характеристик генератора и инвертора при реализации рекуперативного торможения при исключении блока балластных резисторов;

- результаты математического моделирования в среде *MatLab/Simulink* электровоза переменного тока с ВИП на базе *IGBT*-транзисторов при исключении балластного резистора из якорной цепи тяговых электрических двигателей.

**Достоверность научных положений и результатов.** Достоверность теоретических представлений подтверждается результатами, полученными при математическом моделировании в среде *MatLab/Simulink*, совпадением их с результатами экспериментальных исследований в сервисном локомотивном депо «Боготол-Сибирский», погрешность не превышает 10 %.

**Апробация работы.** Основные положения работы и результаты исследований докладывались и обсуждались на третьей всероссийской научно-практической конференции «Наука и молодежь» (ИрГУПС, Иркутск 2017 г., 2020 г., 2021 г.); девятой международной научно-практической конференции «Транспортная инфраструктура Сибирского региона» (ИрГУПС, Иркутск 2018 г., 2020 г., 2021 г.); международной научно-практической конференции «Инновационные технологии развития транспортной отрасли» (ДВГУПС, Хабаровск 2019 г.); международной научно-практической конференции «Эксплуатация и обслуживание электронного и микропроцессорного оборудования тягового подвижного состава» (АО «ДЦВ» Красноярской железной дороги, Красноярск 2020 г.); седьмой международной научно-практической конференции «Локомотивы. Электрический транспорт – XXI век» (ПГУПС, Санкт-Петербург 2020 г.).

Автор является победителем конкурса «Участник молодежного научно-инновационного конкурса» («УМНИК») по теме «Разработка бортового аппаратно-программного комплекса ресурсо- и энергосбережения для режима рекуперативного торможения электровозов переменного тока», по данной работе выполнена научно-исследовательская работа по договору №16798ГУ/2021 от 07.06.2021 г.

Диссертация доложена на заседании кафедры «Электроподвижной состав» (ИрГУПС, г. Иркутск), протокол № 14 от 29.06.2021 г.

Диссертация доложена на расширенном заседании кафедры «Электроподвижной состав» (ИрГУПС, г. Иркутск), протокол № 2 от 12.10.2021 г.

Диссертация доложена и рекомендована к защите на заседании научно-технического семинара кафедры «Электропоезда и локомотивы» (РУТ (МИИТ), г. Москва), протокол № 1 от 08.02.2022 г.

**Личный вклад соискателя.** Проведен анализ существующих технических средств, способов и алгоритмов управления тиристорными и транзисторными выпрямительно-инверторными преобразователями электровоза, направленных на повышение эффективности рекуперативного торможения. Проведено аналитическое исследование электрической устойчивости режима рекуперативного торможения электровоза переменного тока с тиристорным ВИП, предложена методика обеспечения электрической устойчивости системы рекуперативного торможения электровоза переменного тока с транзисторным ВИП при исключении ББР из силовой цепи электровоза. Разработан способ реализации рекуперативного торможения электровоза переменного тока с ВИП на базе *IGBT*-транзисторов при исключении блока балластных резисторов из его силовой цепи. Разработан алгоритм основной программы блока управления ВИП на базе *IGBT*-транзисторов для организации положительного наклона внешней характеристики преобразователя с целью

обеспечения статической устойчивости режима рекуперативного торможения без блока балластных резисторов. Доработана математическая модель системы «тяговая подстанция – контактная сеть – электровоз» в режиме рекуперативного торможения в среде *MatLab/Simulink* с учетом применения предлагаемого алгоритма управления ВИП на базе *IGBT*-транзисторов при реализации рекуперативного торможения без ББР в силовой цепи электровоза. Проведены экспериментальные исследования предлагаемого способа реализации рекуперативного торможения при исключении блока балластных резисторов из силовой цепи электровоза с транзисторным ВИП на испытательной станции СЛД «Боготол-Сибирский».

**Публикации.** Основное содержание диссертации опубликовано в 17 печатных трудах, из них три статьи опубликованы в ведущих научных рецензируемых журналах и изданиях перечня ВАК РФ, одна статья в журнале, индексируемом в научной базе *Scopus*, один патент на изобретение.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех разделов, выводов, библиографического списка из 112 наименований и содержит 154 страницы основного текста, 22 таблицы и 106 рисунков.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, дана краткая её характеристика.

**В первом разделе** работы проведен анализ научных трудов в области повышения эффективности режима рекуперативного торможения современных отечественных электровозов переменного тока. Показана тенденция развития технических средств, способов и алгоритмов управления преобразователями электровоза переменного тока, повышающие энергетические показатели ЭПС. Особый интерес современного отечественного и зарубежного электровозостроения вызвали тяговые преобразователи на базе биполярных транзисторов с изолированным затвором (*IGBT*), позволяющие значительно повысить энергетические показатели электровоза. Применение таких силовых полупроводниковых приборов (СПП) позволяет решить существенную проблему обеспечения силовых схем электровозов переменного тока полностью управляемыми СПП. Анализ показал, что вопрос обеспечения статической устойчивости режима рекуперативного торможения с целью исключения блока балластных резисторов из якорной цепи тяговых электродвигателей не рассматривался. На основании проведенного анализа работ в области рекуперативного торможения электровоза переменного тока определена цель работы и сформулированы задачи исследования.

**Во втором разделе** приведены результаты расчета на основе теории электрической устойчивости режима рекуперативного торможения на электровозах переменного тока. Проведен аналитический расчет статической устойчивости режима рекуперативного торможения.



Статическая устойчивость определяется пересечением характеристик цепи двигателя и нагрузки. Взаимный наклон характеристик в этих точках должен удовлетворять условию статической устойчивости системы электрического рекуперативного торможения. Таким образом, условие статической устойчивости режима рекуперативного торможения можно определить неравенством

$$\frac{dU_d}{dI_d} < \frac{dU_u}{dI_d}, \quad (1)$$

где  $U_d$ ,  $U_u$  – напряжение на генераторе и инверторе соответственно, В;

$I_d$  – ток генератора, А.

Также рассмотрена организация статической устойчивости режима рекуперативного торможения при работе штатного тиристорного ВИП. Наклон характеристик инвертора по мере увеличения протекающего в цепи тока зависит от закона управления инвертора. Например, согласно закону управления с постоянным углом опережения отпирания тиристоры ВИП  $\beta = const$ , режим рекуперативного торможения имеет статическую устойчивость без применения балластных резисторов в якорной цепи. Внешняя характеристика генератора без балластных резисторов в его цепи практически прямолинейна и не имеет наклона, т.к. падение напряжения в нем с ростом тока невелико из-за незначительного внутреннего сопротивления. Однако, несмотря на то, что по закону управления с постоянным углом опережения  $\beta$  не требуется наличие балластных резисторов в якорной цепи генераторов, при такой организации управления ВИП коэффициент мощности электровоза в режиме рекуперативного торможения находится в пределах 0,48, что обусловлено значительным потреблением реактивной энергии из контактной сети. Принимая угол  $\beta$  постоянным при малых нагрузках ТЭД, когда величина угла коммутации  $\gamma$  мала, угол запаса  $\delta$  неоправданно избыточен

$$\beta = \delta + \gamma, \quad (2)$$

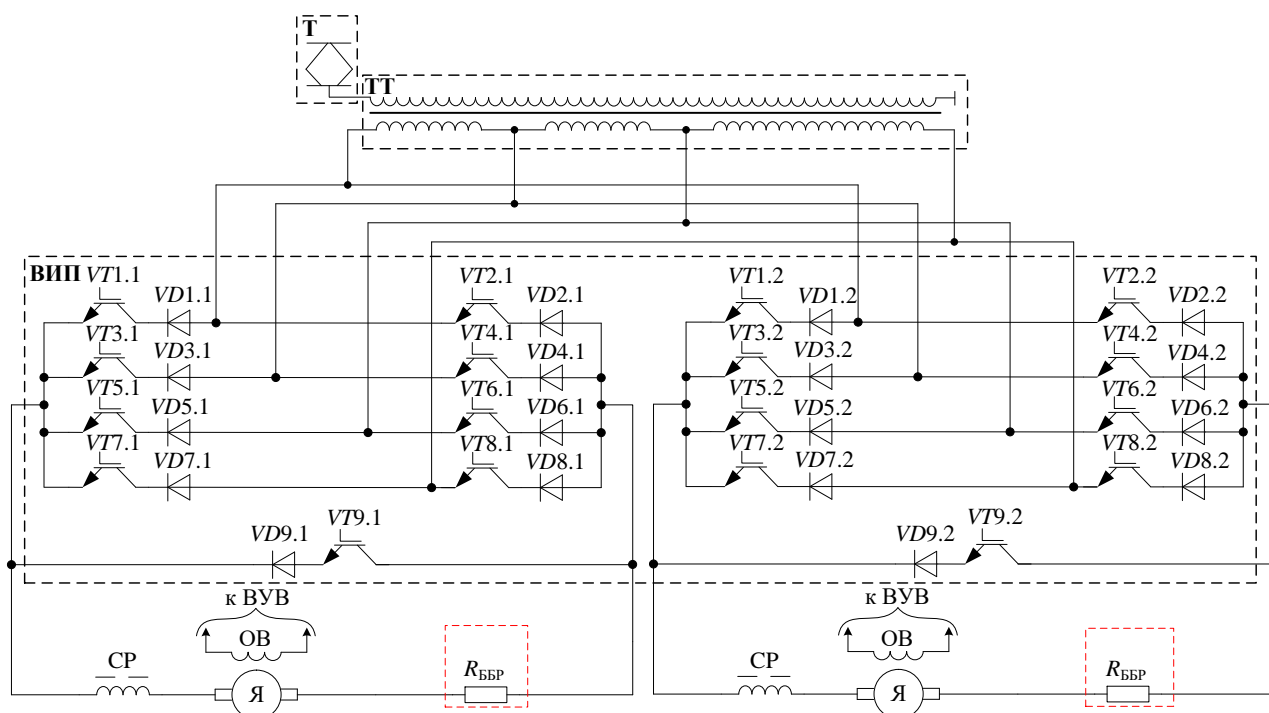
где  $\delta$  – угол запаса инвертора, эл. град.;

$\gamma$  – угол коммутации плеч ВИП, эл. град.

С целью устранения этого недостатка на современных отечественных электровозах переменного тока регулирование угла опережения открытия тиристоры осуществляется с поддержанием минимально-допустимого угла запаса по закону  $\delta = const$ . Такая организация управления ВИП позволяет повысить коэффициент мощности электровоза в режиме рекуперативного торможения до значения 0,65 на 3,5 зоне регулирования напряжения ВИП. Однако, несмотря на повышение коэффициента мощности, по сравнению с  $\beta = const$ , данный закон управления влечет за собой серьезный недостаток – применение балластного резистора в якорной цепи ТЭД, необходимого для придания внешней характеристике генератора более крутого наклона с целью обеспечения статической устойчивости режима рекуперативного торможения электровоза.

С развитием информационной и силовой электроники вопрос статической устойчивости может быть решен при использовании управляемых силовых

полупроводниковых приборов в плечах ВИП – *IGBT*-транзисторов (рисунок 1) и алгоритма управления ими (таблица 1).



**Рисунок 1 – Упрощенная принципиальная силовая электрическая схема электровоза переменного тока с ВИП на базе *IGBT*-транзисторов**

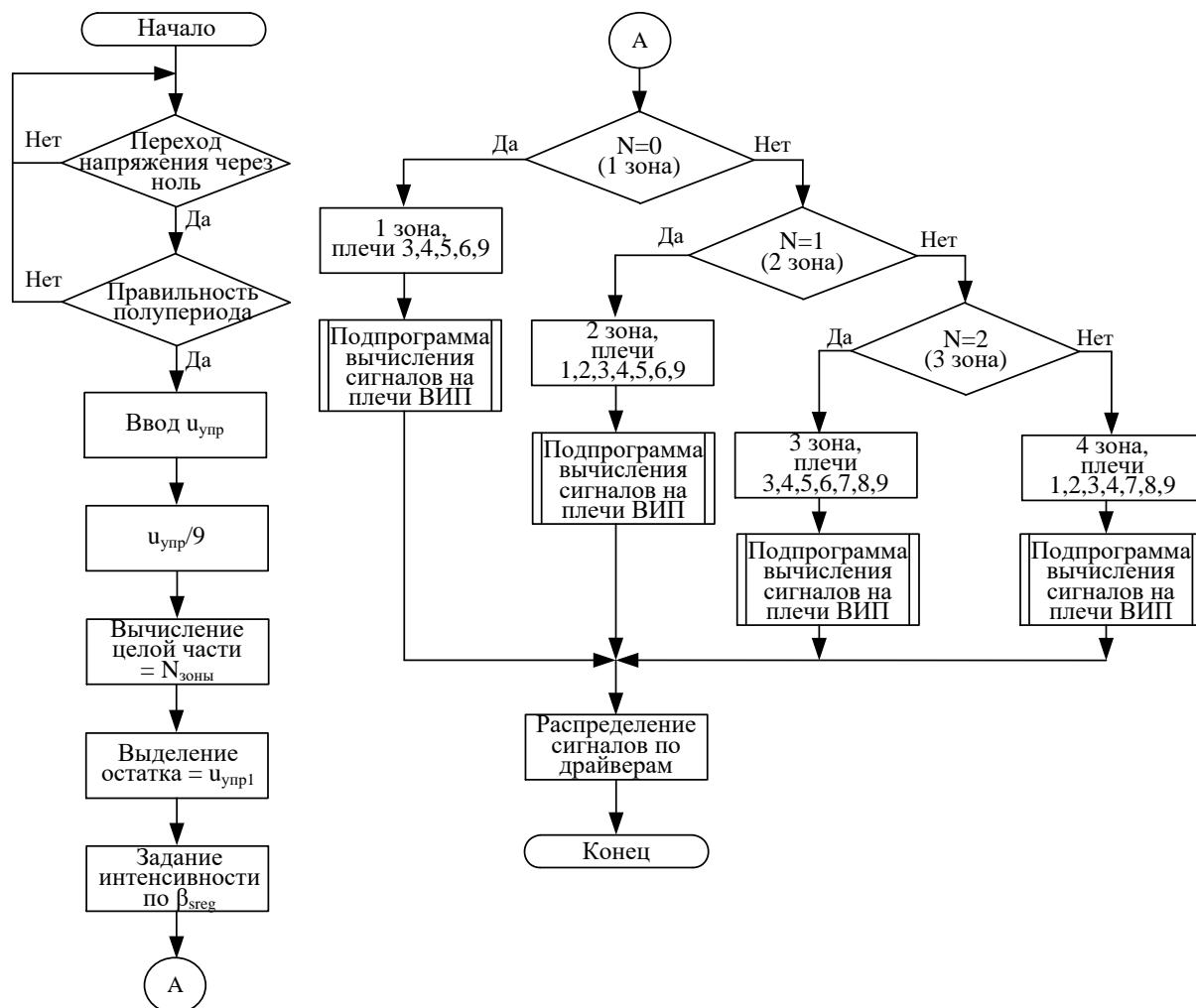
**Таблица 1 – Алгоритм управления ВИП на базе *IGBT*-транзисторов при реализации режима рекуперативного торможения без ББР в якорной цепи ТЭД**

Номер зоны	Направление ЭДС в обмотках трансформатора	Транзисторные плечи выпрямительно-инверторного преобразователя								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
4	→	$\beta_{breg}$	-	$\beta_{sreg}$	-	-	-	-	$\beta_w$	$W_w$
	←	-	$\beta_{breg}$	-	$\beta_{sreg}$	-	-	$\beta_w$	-	$W_w$
3	→	-	-	$\beta_{breg}$	-	$\beta_{sreg}$	-	-	$\beta_w$	$W_w$
	←	-	-	-	$\beta_{breg}$	-	$\beta_{sreg}$	$\beta_w$	-	$W_w$
2	→	$\beta_{breg}$	-	$\beta_{sreg}$	-	-	$\beta_w$	-	-	$W_w$
	←	-	$\beta_{breg}$	-	$\beta_{sreg}$	$\beta_w$	-	-	-	$W_w$
1	→	-	-	$\beta_{reg}$	-	-	$\beta_{reg}$	-	-	$W_w$
	←	-	-	-	$\beta_{reg}$	$\beta_{reg}$	-	-	-	$W_w$

Примечание:  
 $\beta_{reg}$  – угол регулирования фазы отпирания транзисторов плеча ВИП;  
 $\beta_w$  – рабочий угол отпирания силовых транзисторов плеча ВИП;  
 $\beta_{sreg}$  – регулируемый угол отпирания транзисторов плеча ВИП по малому контуру;  
 $\beta_{breg}$  – регулируемый угол отпирания транзисторов плеча ВИП по большому контуру;  
 $W_w$  – угол запирающего транзистора девятого плеча ВИП.

Для обеспечения устойчивой работы рекуперативного торможения без блока балластных резисторов необходимо, чтобы внешняя характеристика инвертора имела положительный наклон, т.е. по мере увеличения тока в цепи необходимо чтобы увеличивалось и напряжение ВИП. В предлагаемом способе организации статической устойчивости режима рекуперативного торможения положительный наклон внешней

характеристики достигается за счет разработанного алгоритма управления транзисторным ВИП. Блок-схема алгоритма работы основной программы БУ ВИП с предлагаемым способом реализации рекуперативного торможения без ББР представлена на рисунке 2.



**Рисунок 2 – Блок-схема алгоритма работы основной программы БУ ВИП с предлагаемым способом реализации рекуперативного торможения без ББР в силовой цепи электровоза**

Блок-схема работы подпрограммы вычисления сигналов на плечи ВИП представлена на рисунке 3.

Временные диаграммы работы плеч ВИП при реализации рекуперативного торможения без ББР показаны на рисунке 4.

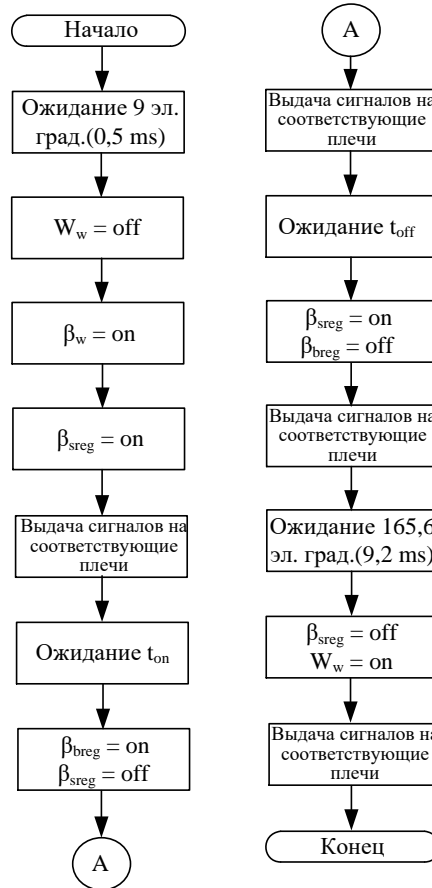


Рисунок 3 – Блок-схема работы подпрограммы вычисления сигналов на плечи ВИП

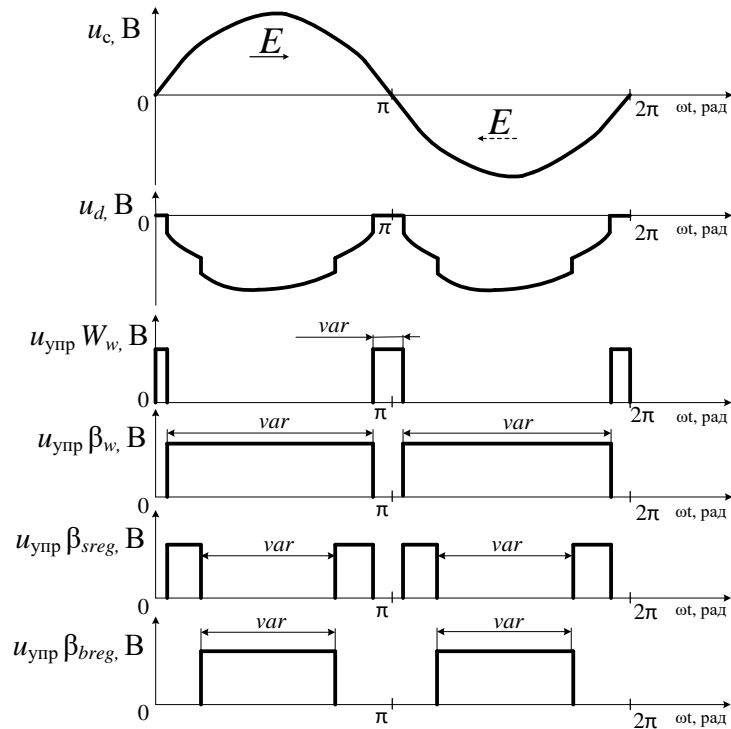


Рисунок 4 – Временные диаграммы работы плеч ВИП при реализации предлагаемого алгоритма управления

Величина средневыпрямленного напряжения ВИП в точке холостого хода при  $I_d = 0$

$$U_{u0i} = \frac{2 \times \sqrt{2}}{\pi} \times U_{mi} = 0,9 \times U_{mi}, \quad (3)$$

где  $U_{mi}$  – действующее значение напряжения вторичной обмотки тягового трансформатора на  $i$  зоне регулирования, В.

Величина средневыпрямленного напряжения ВИП в номинальном режиме при  $I_d = I_{дн} = 810$  А с учетом падения напряжения  $\Delta U$

$$U_{uni} = U_{u0i} \pm \Delta U = U_{u0i} \pm I_{дн} \times R_{эп} - \Delta U_B, \quad (4)$$

где  $I_{дн}$  – номинальный ток генератора, А;

$R_{эп}$  – эквивалентное сопротивление, определяющее наклон характеристики инвертора, Ом;

$\Delta U_B$  – падение напряжения в плечах ВИП, В.

В данном выражении эквивалентное сопротивление определяется по формуле

$$R_{эп} = \lambda \times \frac{2}{\pi} \times X_T + \xi \times R_T + R_d, \quad (5)$$

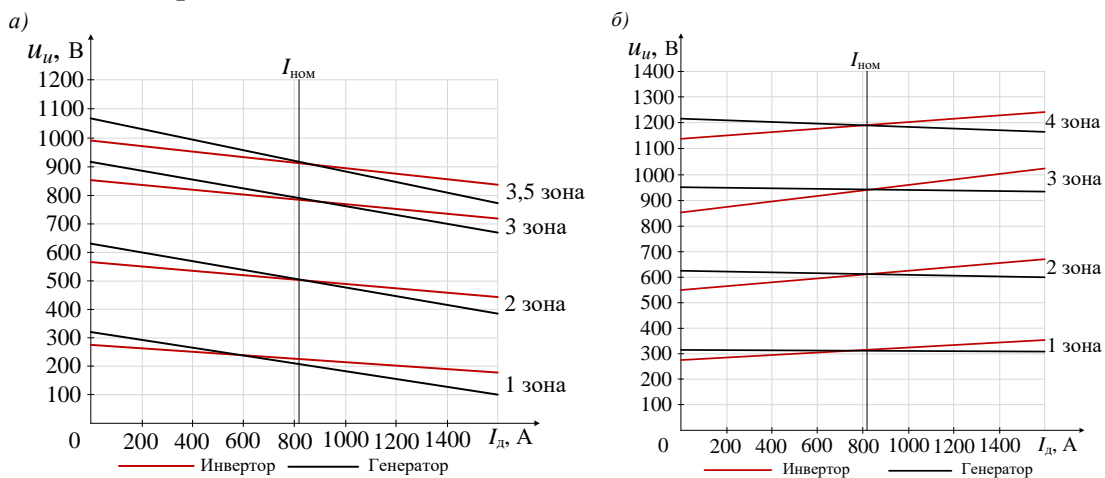
где  $\lambda$  – коэффициент, учитывающий влияние пульсаций;

$\xi$  – отношение амплитудного значения напряжения на вторичной обмотке тягового трансформатора к значению данного напряжения последующей зоны;

$X_T, R_T$  – индуктивное и активное сопротивление трансформатора, Ом;

$R_d$  – внутреннее сопротивление двигателя, Ом.

Проведенный аналитический расчет внешней системы «генератор-инвертор» (рисунок 5) показывает, что система рекуперативного торможения с тиристорным ВИП имеет статическую устойчивость только при условии наличия дополнительного активного сопротивления в цепи тягового электродвигателя, в роли которого выступает ББР. При реализации рекуперативного торможения с ВИП на базе IGBT-транзисторов система является статически устойчивой при исключении ББР из якорной цепи ТЭД при одновременной организации положительного наклона внешней характеристики ВИП и в полной мере отражают качественное соответствие теоретическим представлениям.



а – тиристорный ВИП с ББР в якорной цепи ТЭД; б – ВИП на базе IGBT-транзисторов с предлагаемым алгоритмом управления при исключении ББР из якорной цепи ТЭД

**Рисунок 5 – Внешние характеристики системы «генератор-инвертор»**

Коэффициент полезного действия электрической цепи электровоза переменного тока при реализации рекуперативного торможения представляет собой отношение активной мощности, отдаваемой в сеть, к мощности, вырабатываемой тяговыми двигателями в генераторном режиме

$$\eta = \frac{U_d \times I_d - I \left( \frac{1}{k_T^2} \times R_1 \times R_2 \right) \times \frac{I_{T3}}{I_d} + R_{B0} + R_d \times I_d^2 + \Delta U_B \times I_d + \Delta P_{TT}}{U_d \times I_d}, \quad (6)$$

где  $R_1$ ,  $R_2$  – активные сопротивления первичной и вторичной обмотки тягового трансформатора, Ом;

$k_T$  – коэффициент трансформации тягового трансформатора, отн. ед.;

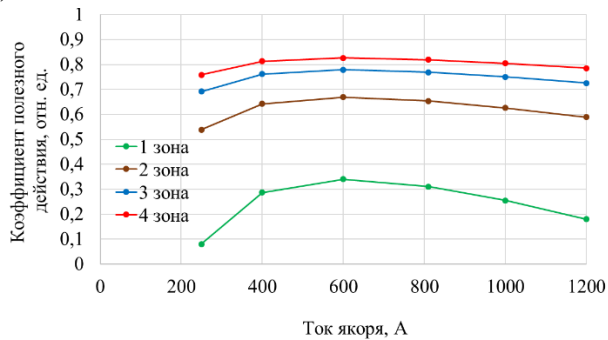
$I_{T3}$  – действующее значение переменного тока, А;

$R_{B0}$  – активное сопротивление общей цепи выпрямленного тока, Ом;

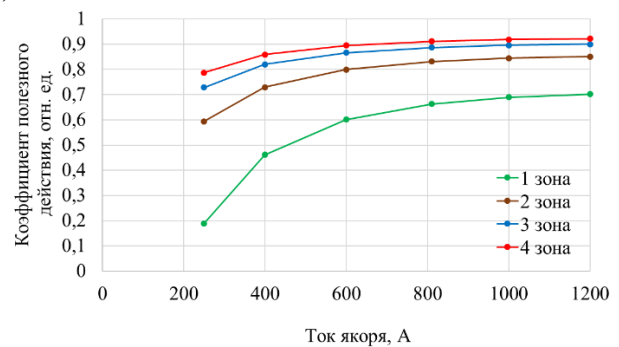
$\Delta P_{TT}$  – потери мощности в обмотках тягового трансформатора, кВт.

Мощность потерь в цепи выпрямленного тока включает в себя мощность, поглощаемую балластными резисторами, сопротивление которых на электровозах переменного тока серии «Ермак» составляет 0,144 Ом. Эта мощность в часовом режиме составляет 95 кВт на каждый ТЭД, т.е. около 10 %.

а)



б)



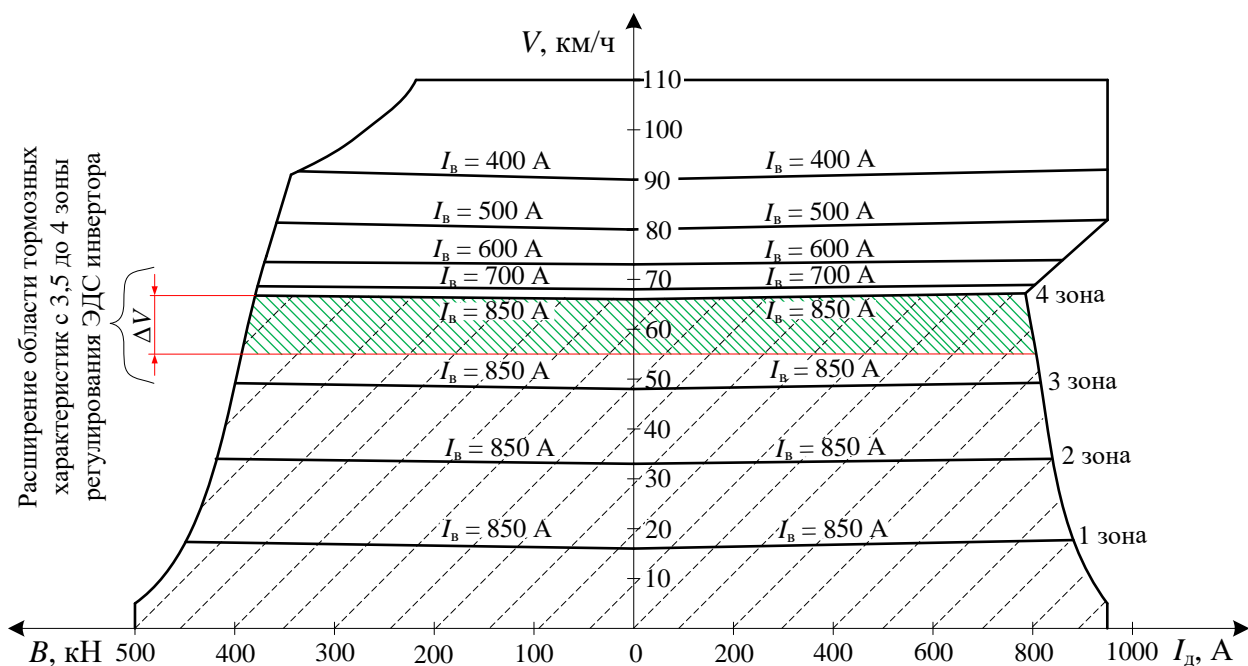
а – при наличии ББР в якорной цепи ТЭД; б – при исключении ББР из якорной цепи ТЭД

**Рисунок 6 – График зависимости коэффициента полезного действия электрической цепи электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения от тока ТЭД**

Увеличение коэффициента полезного действия электрической цепи электровоза переменного тока, работающего в режиме рекуперативного торможения составляет в среднем 8,9 % для 4-ой зоны регулирования ВИП, 11,8 % для 3-ей зоны, 19,2 % для 2-ой зоны и 54,7 % для 1-ой зоны регулирования напряжения. Наибольшее увеличение КПД наблюдается в зоне низких скоростей при реализации первой зоны регулирования напряжения ВИП, т.к. потери в балластных резисторах сохраняются неизменными при регулировании напряжения инвертора.

Наличие ББР в силовой цепи электровоза ограничивает область тормозных характеристик на уровне 3,5 зоны регулирования, что уменьшает возврат электроэнергии в контактную сеть. Выполненный расчет тормозных характеристик электровоза при исключении ББР показал, что расширение их области с 3,5 до 4 зоны,

увеличивает максимальную скорость движения поезда в режиме рекуперативного торможения на 12 км/ч (рисунок 7).

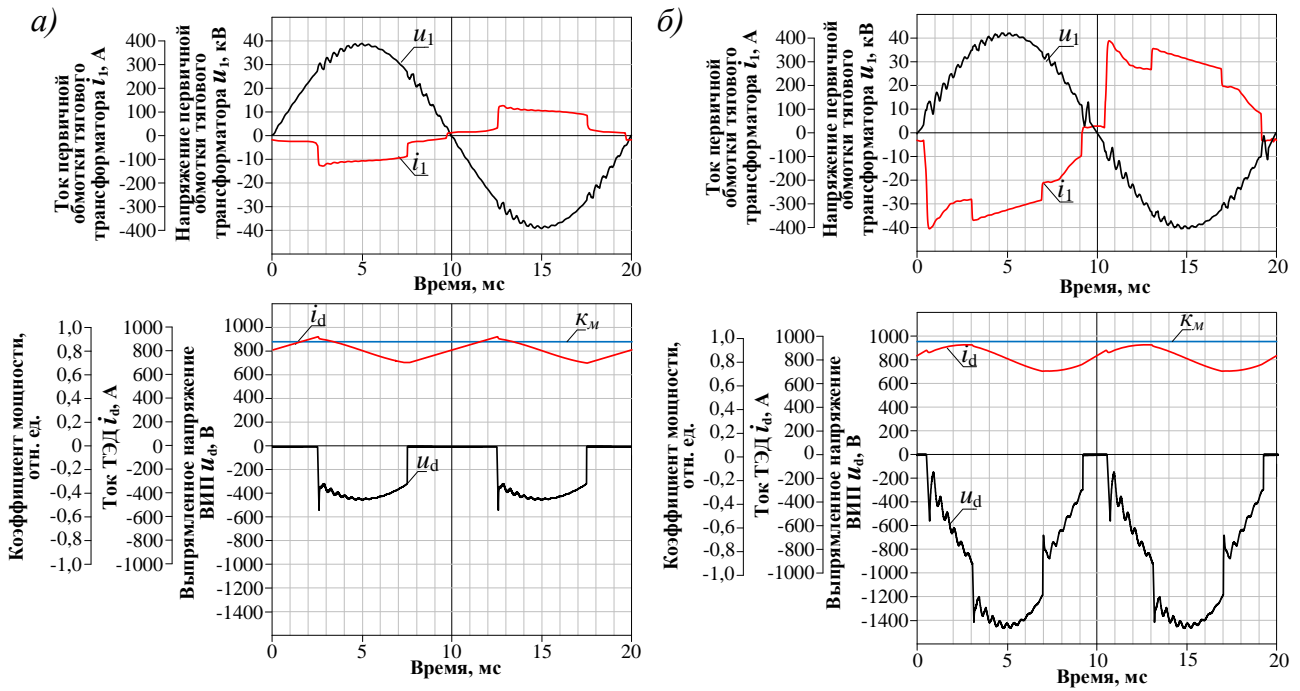


**Рисунок 7 – Тормозные характеристики электровоза переменного тока с ВИП на базе IGBT-транзисторов и предлагаемым алгоритмом управления при исключении балластных сопротивлений из якорных цепей ТЭД**

**Третий раздел** посвящен математическому моделированию электромагнитных процессов, протекающих в электровозе. Была дополнена математическая модель системы «Тяговая подстанция – контактная сеть – электровоз» для режима рекуперативного торможения путем включения ВИП на базе IGBT-транзисторов и его алгоритма управления, позволяющего исключить ББР из якорной цепи ТЭД. В основу математической модели лежат результаты исследований ученых А.Н. Савоськина, С.В. Власьевского, Ю.М. Кулинича и М.З. Жица.

Уточненная математическая модель позволяет производить исследования при различных способах управления и элементной базе ВИП электровоза и анализировать протекающие электромагнитные процессы. После дополнения математической модели была проведена оценка адекватности протекающих в ней электромагнитных процессов, путем сравнения их с процессами, полученными в результате экспериментальных исследований, погрешность не превышает 10 %.

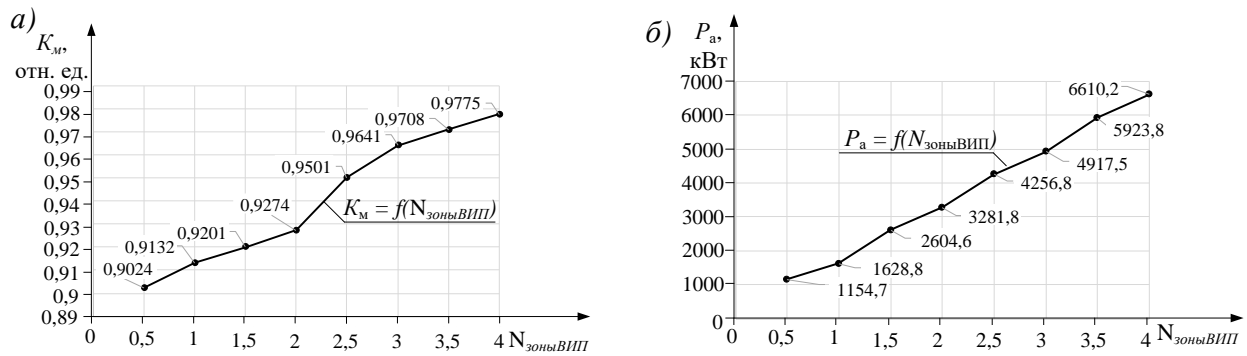
На математической модели получены временные диаграммы электромагнитных процессов тока и напряжения на первичной обмотке тягового трансформатора, тока генератора и выпрямленного напряжения ВИП для транзисторного ВИП с предлагаемым алгоритмом управления им (рисунок 8).



а – 0,5 зоны регулирования напряжения; б – 3,5 зоны регулирования напряжения

**Рисунок 8 – Диаграммы электромагнитных процессов напряжения ( $u_1$ ) и тока ( $i_1$ ) в первичной обмотке тягового трансформатора электровоза, выпрямленного напряжения ( $u_d$ ) и выпрямленного тока ( $i_d$ ) при работе ВИП на базе IGBT-транзисторов с предлагаемым алгоритмом управления при исключении ББР из якорной цепи ТЭД**

Получены зависимости коэффициента мощности (рисунок 9, а) и активной мощности на первичной обмотке тягового трансформатора (рисунок 9, б) от зоны регулирования напряжения ВИП.



а – зависимость коэффициента мощности от зоны регулирования напряжения ВИП;

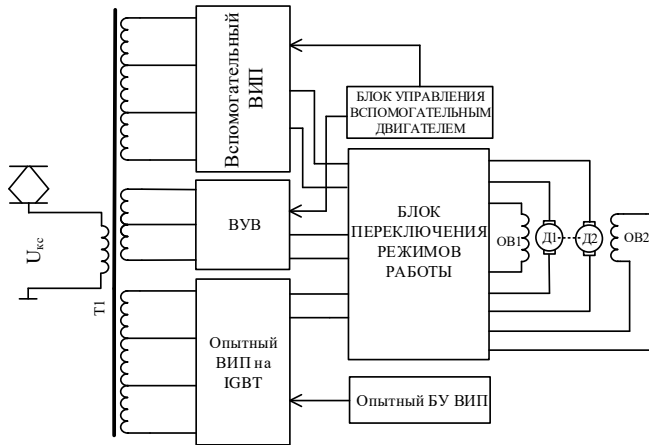
б – зависимость активной мощности рекуперации от зоны регулирования напряжения ВИП

**Рисунок 9 – Зависимости, полученные в результате математического моделирования**

В четвертом разделе для подтверждения теоретических положений предлагаемого технического решения и определения адекватности дополненной в среде *Matlab/Simulink* математической модели «Тяговая подстанция – контактная сеть – электровоз» проведены экспериментальные исследования предлагаемого способа реализации рекуперативного торможения без блока балластных резисторов на физической модели.



Экспериментальные исследования производились под напряжением контактной сети на полномасштабном стенде в Сервисном локомотивном депо «Боготол-Сибирский» филиала «Восточно-Сибирский ООО «ЛокоТех-Сервис», осуществляющем режим взаимонагрузки тяговых двигателей (рисунок 10). Станция включает в себя тяговый трансформатор (рисунок 11, а), к выводам которого подключен вспомогательный ВИП (рисунок 11, б) для питания тягового двигателя, создающего вращающий момент для второго ТЭД (рисунок 11, в).



Второй ТЭД получает питание от опытного ВИП на базе IGBT-транзисторов с предлагаемым алгоритмом управления для исключения ББР из силовой цепи (рисунок 11, г). Переключение режимов работы, управление вспомогательным тиристорным ВИП и опытным ВИП на базе IGBT-транзисторов производилось с пульта управления испытательной станции.

**Рисунок 10 – Функциональная схема стенда для проведения испытаний**

а)



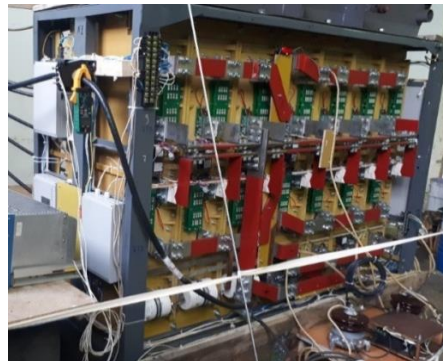
б)



в)



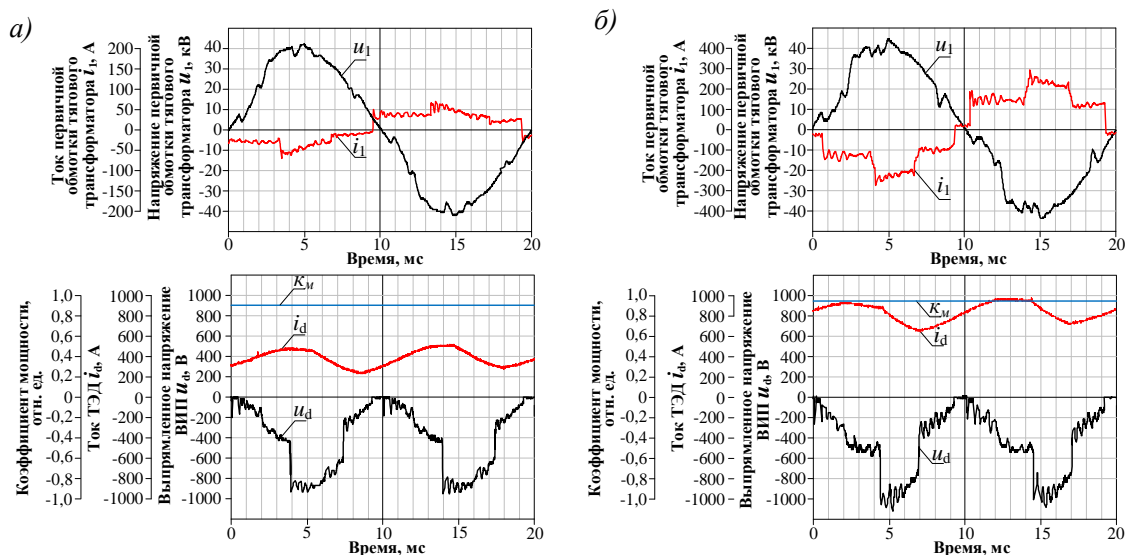
г)



а – тяговый трансформатор; б – вспомогательный тиристорный ВИП; в – тяговые электрические двигатели; г - опытный ВИП на базе IGBT-транзисторов с предлагаемым алгоритмом управления для исключения ББР из силовой цепи

**Рисунок 11 – Составляющие испытательного стенда сервисного локомотивного депо «Боготол-Сибирский»**

В результате проведения испытаний были получены временные диаграммы электромагнитных процессов тока и напряжения на первичной обмотке тягового трансформатора, тока генератора и выпрямленного напряжения ВИП для транзисторного ВИП с предлагаемым алгоритмом управления им в режиме рекуперативного торможения (рисунок 12).



а – 1,5 зоны регулирования напряжения ВИП; б – 2,5 зоны регулирования напряжения ВИП

**Рисунок 12 – Диаграммы электромагнитных процессов напряжения ( $u_1$ ) и тока ( $i_1$ ) в первичной обмотке тягового трансформатора, выпрямленного напряжения ( $u_d$ ) и выпрямленного тока ( $i_d$ ) при работе экспериментального ВИП на базе IGBT-транзисторов**

Полученные в ходе экспериментальных исследований электромагнитные процессы в полной мере отражают работоспособность системы рекуперативного торможения при исключении ББР из силовой цепи при заявленном способе управления транзисторным ВИП. В главе произведен расчет технико-экономических показателей при реализации предлагаемого способа в расчете на один электровоз серии 2ЭС5К.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1 Разработан алгоритм управления ВИП на базе IGBT-транзисторов, который в зависимости от тока ТЭД обеспечивает подбор и регулировку угла отпирания транзисторов  $\beta_w = var$  и  $W_w = var$  с целью обеспечения положительного наклона внешней характеристики ВИП в режиме инвертора и статической устойчивости системы «генератор-инвертор» без применения ББР в якорной цепи ТЭД.

2 Проведен расчет внешних характеристик генератора и инвертора на базе IGBT-транзисторов при наличии и исключении ББР из якорной цепи ТЭД, который показал, что система имеет статическую устойчивость при исключении ББР и реализации предлагаемого алгоритма управления транзисторным ВИП на всех 4-х зонах регулирования напряжения ВИП.

3 Исключение ББР позволит расширить область тормозных характеристик электровоза с 3,5 до полной 4-ой зоны регулирования напряжения ВИП, за счет этого повышается скорость электровоза в режиме рекуперативного торможения на 12 км/ч, при этом увеличивается величина рекуперлируемого тока на 12 %, а активная мощность рекуперации на 10 %.

4 За счет исключения ББР повышается КПД электрической цепи электровоза переменного тока, работающего в режиме рекуперативного торможения в среднем на 8,9 % для 4-ой зоны регулирования ВИП, 11,8 % для 3-ей зоны, 19,2 % для 2-ой зоны и 54,7 % для 1-ой зоны регулирования напряжения.

5 Проведена оценка адекватности работы математической модели в сравнении с физическим экспериментальным исследованием, которая показала, что погрешность при проведении моделирования не превышает 10 %.

6 Проведено математическое моделирование в среде *Matlab/Simulink* для системы «тяговая подстанция-контактная сеть-электровоз», в рамках которого получены диаграммы кривых электромагнитных процессов, подтверждающие работоспособность разработанного алгоритма управления транзисторным ВИП при исключении ББР, также получены данные для построения внешних характеристик системы «генератор-инвертор», которые показывают, что система является статически устойчивой при исключении ББР из якорной цепи.

7 Проведены экспериментальные исследования предлагаемого способа реализации рекуперативного торможения на экспериментальном стенде СЛД «Боготол-Сибирский», филиала Восточно-Сибирский ООО «ЛокоТех-Сервис» с целью апробирования заявленного способа, полученные диаграммы кривых электромагнитных процессов позволяют сделать вывод о работоспособности системы рекуперативного торможения с ВИП на базе *IGBT*-транзисторов при исключении ББР из силовой цепи электровоза.

8 Разработанный способ реализации рекуперативного торможения рекомендуется к применению на ЭПС переменного тока с коллекторным приводом, оборудованном ВИП на базе *IGBT*-транзисторов. Проведена технико-экономическая оценка, годовой экономический эффект от внедрения транзисторного ВИП и исключения ББР с электровоза 2ЭС5К в размере 1281,92 тыс. руб., срок окупаемости предлагаемой системы рекуперативного торможения составляет 7 лет. При оборудовании всех электровозов серии «Ермак», работающих на Восточном полигоне, годовая экономия денежных средств от увеличения отдачи электроэнергии в контактную сеть без учета стоимости снятого оборудования составит 1133112,96 тыс. руб.

9 Перспективой дальнейшей разработки темы является оценка чувствительности и быстродействия алгоритма управления выпрямительно-инверторным преобразователем на базе *IGBT*-транзисторов при реализации предлагаемого способа обеспечения электрической устойчивости рекуперативного торможения при бросках тока и напряжения в контактной сети при аварийных режимах работы, а также при пониженном и повышенном напряжении в контактной сети.

### Список работ, опубликованных по теме диссертации

Статьи, опубликованные в рецензируемых журналах, включенных в перечень, утвержденный ВАК:

1 Томилов, В.С. Совершенствование силовой цепи электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения / В.С. Томилов, И.А. Баринов, О.В. Мельниченко, С.Г. Шрамко, А.О. Линьков. Текст – непосредственный. // Вестник Иркутского государственного технического университета. - 2019. - Т.23. № 2. с. 346–355.

2 Томилов, В. С. Повышение энергетической эффективности работы электровозов переменного тока / В.С. Томилов, О.В. Мельниченко, С.Г. Шрамко, С.А. Богинский. // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2020. – Т. 65 № 1. – с. 172–182.

3 Томилов, В.С. Моделирование работы электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения / В.С. Томилов // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. № 2 (50). 2021. с. 106-114.

Статьи в издании, входящем в международную систему цитирования Scopus:

4 Томилов В.С. Proposals for Introduction of Modern Power Semiconductor Devices Into Converter-Fed Commutator Motor Locomotives of Russian Railways. / В.С. Томилов, Т.В. Волчек, И.А. Баринов. Пром-Инжиниринг: Материалы междунар. науч.-техн. конф. (англ. 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM). – 2020. Оpubл. в IEEE Xplore Digital Library, изд-во Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE. – Режим доступа (DOI): 10.1109/icieam48468.2020.9112012.

Авторские свидетельства и патенты:

5 Патент № 2721084 Российская Федерация, МПК H02P 7/292. Способ реализации рекуперативного торможения без балластных резисторов на электровозах переменного тока: № 2019134725; заявл. 29.10.2019; опубл. 15.05.2020 / Мельниченко О.В., Томилов В.С., Шрамко С.Г., Портной А.Ю., Линьков А.О., Волчек Т.В.; заявитель ФГБОУ ВО ИргУПС. – 12 с.

Публикации в других изданиях:

6 Томилов, В.С. Повышение энергетической эффективности электровозов переменного тока в режиме рекуперативного торможения за счет исключения из силовой цепи ББР. / В.С. Томилов, О.В. Мельниченко // «Наука и молодежь»: сборник трудов Третьей Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых.; – ИргУПС. – Иркутск. – 2017 г. – с. 33-36.

7 Томилов, В.С. Способ реализации рекуперативного торможения без блока балластных резисторов на электровозах переменного тока. / В.С. Томилов, О.В. Мельниченко, С.Г. Шрамко // «Science and Practice: New Discoveries»: сборник трудов Третьей Международной научной конференции - Чехия, Карловы Вары, 2017 г. – с. 159-165.

8 Томилов, В.С. Анализ способов и технических решений повышения коэффициента мощности электровозов переменного тока в режиме рекуперативного

торможения / В.С. Томилов, О.В. Мельниченко, С.Г. Шрамко, С.В. Власьевский // Сборник трудов Девятой международной научно-практической конференции: Транспортная инфраструктура Сибирского региона.; – ИрГУПС. – Иркутск. 2018 г. – с. 448-452.

9 Томилов, В.С. Модернизация силовой цепи электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения. / В.С. Томилов, Т.В. Волчек, О.В. Мельниченко // «Наука и молодежь»: сборник трудов Четвертой Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых.; – ИрГУПС. – Иркутск. – 2018 г. – с. 148-152.

10 Томилов, В.С. Способ реализации рекуперативного торможения на электровозах переменного тока серии «Ермак» без блоков балластных резисторов / В.С. Томилов, О.В. Мельниченко, С.Г. Шрамко // «Resonances science»: сборник трудов Третьей Международной научно-практической конференции (ноябрь 2018 г.) – Чехия, Карловы Вары, 2018. – с. 153-161.

11 Томилов, В.С. Математическое моделирование электромагнитных процессов электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения без применения блоков балластных резисторов в силовой цепи электровоза. / В.С. Томилов, С.Е. Письменных, О.В. Мельниченко, С.Г. Шрамко // «Scientific Research»: сборник трудов Четвертой Международной научно-практической конференции (ноябрь 2018) – Чехия, Карловы Вары, 2018 г. – с. 204-211.

12 Томилов, В.С. Увеличение отдачи электроэнергии электровозом переменного тока и расширение области его тормозных характеристик при реализации рекуперативного без блоков балластных резисторов / В.С. Томилов, О.В. Мельниченко // «Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона» № 3(20) – ДВГУПС, Хабаровск, 2019, с. 26.-29.

13 Томилов, В.С. Реализация рекуперативного торможения на отечественных электровозах переменного тока без блоков балластных резисторов / В.С. Томилов, О.В. Мельниченко, Т.В. Волчек // Труды Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Эксплуатация и обслуживание электронного и микропроцессорного оборудования тягового подвижного состава», – Красноярск, 24-25 марта 2020г. с. 333-338.

14 Томилов, В.С. Как повысить надежность режима рекуперативного торможения электровозов переменного тока / В.С. Томилов, О.В. Мельниченко, Т.В. Волчек // Ежемесячный производственно-технический и научно-популярный журнал «Локомотив». – №7 (763), июль 2020. с. 20-22.

15 Томилов, В.С. Повышение эффективности режима рекуперативного торможения электровозов переменного тока за счет исключения балластного сопротивления из его силовой цепи / В.С. Томилов, О.В. Мельниченко, Р.И. Устинов. Молодая наука Сибири: электрон. науч. журн. – 2020. – № 4 (10). – Режим доступа: <http://mnv.irkups.ru/toma/410-2020>.

16 Томилов, В.С. Анализ способов и устройств защиты тиристорных преобразователей электроподвижного состава переменного тока. / В.С. Томилов, О.В.

Мельниченко, Р.И. Устинов // Молодая наука Сибири: электрон. науч. журн. – 2020. – № 4 (10). – Режим доступа: <http://mnv.irkups.ru/toma/410-2020>.

17 Томилов, В.С. Повышение эффективности рекуперативного торможения на отечественных электровозах переменного тока / В.С. Томилов, О.В. Мельниченко // Локомотивы. Электрический транспорт – XXI век : материалы VII Международной научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 10–12 ноября 2020 г. – СПб. : ФГБОУ ВО ПГУПС, 2020. – с. 140-146.

Томилов Вячеслав Станиславович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕЖИМА РЕКУПЕРАТИВНОГО  
ТОРМОЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОВОЗА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

2.9.3. Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация  
(технические науки)

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

---

Подписано в печать \_\_\_\_\_ 2022 г.      Заказ № \_\_\_\_\_      Формат 60x90/16  
Усл. печ. л. – 1,375      Тираж 80 экз.

---

664039, Россия, г. Иркутск, ул. Гоголя, дом 53, Глазковская типография